

Recibido: 2 de Mayo de 2014
Aceptado: 16 de Julio de 2014**SETTING AND CHECKING OF AN EXPERIMENTAL MODEL RADIO
PROPAGATION IN SEMI URBAN OUTDOOR ENVIRONMENTS FOR
WIRELESS SYSTEMS IN THE 2.4 GHZ FREQUENCY BAND****AJUSTE Y COMPROBACIÓN DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE RADIO
PROPAGACIÓN EN AMBIENTES EXTERIORES SEMI URBANOS PARA
SISTEMAS INALÁMBRICOS EN LA BANDA DE FRECUENCIA 2.4 GHZ****MSc. Jorge Enrique Herrera Rubio, MSc. William Villamizar Rozo.****Universidad de Pamplona**, Campus Villa Rosario.

Tels: (+577) 5703837 - (+577) 5703742 - (+57) 315 3835874

E-mail: {jherrera, wiviro}@unipamplona.edu.co

Abstract: One way to check the efficiency of an experimental radio propagation model is achieved by adjusting the mathematical expression data with respect to the logarithmic path loss model with reference to the distance to determine the possible attenuation factors and loss that can be presented in the variation of the signal power. The field data are validated using a semi empirical model for determining the power levels measured and estimates obtained among others: inferential statistics, the approximation obtained with mathematical techniques models constrained nonlinear regression and perform comparison of the performance of the experimental with method known radio propagation models.

Keywords: Experimental, coverage, power, radio propagation, propagation model, regression.

Resumen: Una forma de comprobar la eficiencia de un modelo experimental de radio propagación es con el ajuste de los datos de la expresión matemática con respecto al modelo logarítmico de pérdidas de trayectoria, tomando como referencia la distancia para determinar las posibles atenuaciones y factores de pérdida que se puedan presentar en la variación de la potencia de la señal. Los datos obtenidos en campo se validan con el uso de un modelo semi empírico que permite determinar los niveles de potencia medidos y calculados, utilizando entre otros: la estadística inferencial, la aproximación con moldeamientos matemáticos obtenidos con técnicas de regresión no lineal restringida y realizar la comparación del rendimiento del método experimental con modelos de radio propagación conocidos.

Palabras clave: Experimental, cobertura, potencia, radio propagación, modelo de propagación, regresión.

1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes de radio propagación en exteriores y de manera particular los modelos experimentales permiten que a través de mediciones de niveles de intensidad de potencia con dispositivos sencillos, sea posible determinar la cobertura de un equipo transmisor con respecto a un equipo receptor sobre un área de cobertura con línea de vista hasta de 300 metros, con tecnología inalámbrica en frecuencia

2.4 Ghz haciendo más fácil y práctico el proceso de predicción de cobertura para sistemas inalámbricos bajo el estándar IEEE 802.11b/g, teniendo en cuenta que se trata de un fenómeno complejo de radiación de potencia en donde existen muchos factores externos que alteran la intensidad de la señal, es necesario delimitar el perfil de terreno siendo un caso de estudio el ambiente semi urbano para determinar los posibles factores que afectan la cobertura.

En la planeación e implementación de redes inalámbricas es importante predecir el nivel de potencia de la señal, para el cual se aplican modelos de propagación en exteriores de tipo: empíricos, semi empíricos y experimentales. Con respecto a estos últimos, se tiene en cuenta: la morfología, la topología, las condiciones físicas y del ambiental, (para el caso de estudio semi urbano o sub urbano), los niveles de potencia, la distancia entre la estación base y el receptor, la altura del equipo transmisor y los posibles factores que afectan la trayectoria de la señal medida, como son, los fenómenos de: la reflexión, la difracción, la refracción y las características físicas de los materiales, considerados como elementos vulnerables del proceso (Patiño *et al.*, 2012).

Por otra parte, los modelos se obtienen de la combinación de métodos empíricos y análisis estadísticos, llegando a comprobarse que los diseños empíricos permiten realizar el ajuste de las curvas obtenidas en las mediciones de campo generando expresiones representativas que visualizan los datos obtenidos.

2. METODOLOGÍA DEL PROCESO DE AJUSTE

Para el análisis del ajuste, el estudio se dividió de la siguiente forma:

1. Estudio de modelos de propagación
2. Diseño del modelo experimental
3. Formulación del modelo
4. Proceso de ajuste y comprobación

En el análisis de estudio, los datos se obtuvieron por medio de mediciones con equipos de radio que trabajan en la banda de frecuencia de 2,4Ghz sin alterar ninguno de sus componentes internos o antenas externas, se pretende medir el rendimiento de acuerdo al ajuste y calibración que traen los equipos de fabrica, por tanto, el área de cobertura de estudio se realiza con la toma de muestras a distancias de 40 longitudes de onda entre cada uno de los puntos de medición con línea de vista, con el fin de analizar el comportamiento de las potencias se toma como referencia de estudio algunos de los modelos de propagación: Espacio libre, Okumura-Hata, COST-231, Okumura y Young, entre otros.

Los modelos de propagación de radio se pueden clasificar en dos grupos: modelos *outdoor* (exterior) y modelos *indoor* (interior), ateniendo al tamaño de la zona de cobertura; los modelos *outdoor* se pueden dividir en: zonas grandes (macrocelas) y de zonas pequeñas (microcelas).

2.1. Estudio de los Modelos de propagación para exteriores

De acuerdo al estudio realizado en la literatura de (Rappaport, 2002) para los modelos que se citan a continuación, se analizarán dentro del proceso de ajuste con los datos obtenidos en las mediciones, esto con el propósito de determinar las posibles pérdidas e inferir sobre el rendimiento de los mismos, extrapolando valores y variables para cada uno de los modelos tomados como referencia.

2.2 Modelo de Propagación en el Espacio Libre

Este modelo se utiliza para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una clara línea de vista; afirma que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación entre el transmisor y receptor elevada a alguna potencia.

La potencia recibida en el espacio libre por una antena receptora, la cual está separada de la antena transmisora una distancia d , está dada por la ecuación de Friis:

$$Pr(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Donde:

$P_r(d)$	Potencia recibida; la cual es función de la separación T-R (transmisor-receptor).
P_t	Potencia transmitida.
G_t	Ganancia de antena transmisora.
G_r	Ganancia de la antena receptora.
λ	Longitud de onda en metros.
d	Distancia de separación de T-R en metros.
L	Pérdidas del sistema no achacables a la propagación.

Las pérdidas en el espacio libre están dadas por:

$$L = 32.44 + \log_{10}(d) + \log_{10}(f) \quad (2)$$

Donde:

L	Pérdidas por la trayectoria [dB].
f	Frecuencia en [MHz].
d	Distancia [Km].

2.3 Modelo de Propagación Okumura

Este es uno de los modelos más utilizados para la predicción de señales en ambientes urbanos, caso concreto sistemas móviles.

Para frecuencias entre 100 MHz y 3000 MHz y distancias entre 1 km. y 100 km.

$$L[dB] = L_f + A_{mu} - G(h_t) - G(h_r) - G_{area} \quad (3)$$

Donde:

$L[dB]$	Atenuación por trayectoria.
L_f	Atenuación en espacio libre.
A_{mu}	Atenuación relativa promedio (curvas).
$G(h_t)$	Ganancia de la antena de transmisión con altura h_t .
$G(h_r)$	Ganancia de la antena de recepción con altura h_r .
G_{area}	Ganancia debido al tipo de ambiente.

Las pruebas realizadas por Okumura demostraron que la ganancia de la altura de la antena de transmisión varía a un índice de 20 dB por década y la ganancia de la antena receptora varía a un índice de 10 dB por década para alturas menores a 3 m, por lo que llegó a comprobar lo siguiente:

- Para $30m < h_{tx} < 1000m$

$$G(h_{tx}) = 20 \log_{10}(h_{tx}/200) \quad (4)$$

- Para $h_{rx} < 3m$

$$G(h_{rx}) = 10 \log_{10}(h_{rx}/3) \quad (5)$$

- Para $3m < h_{rx} < 10m$

$$G(h_{rx}) = 20 \log_{10}(h_{rx}/3) \quad (6)$$

La atenuación relativa promedio es obtenida de las curvas diseñadas por Okumura, se pueden apreciar en la figura 1:

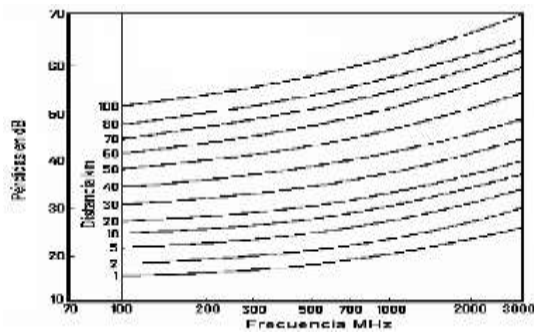


Fig. 1: Curvas de atenuación relativa de Okumura

2.4 Modelo de Propagación Okumura-Hata

Modelo empírico, limitado en frecuencias, es efectivo hasta 1500 MHz. Las pérdidas consideradas por este modelo están dadas por la siguiente ecuación, de acuerdo a (Hata, 1980):

$$L(urb)[dB] = 69.55 + 22.16 \log_{10}(f_c) - 13.16 \log_{10}(h_{tx}) \dots \quad (7)$$

$$- a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{tx})) \log(d)$$

Donde:

f_c Frecuencia de la portadora en MHz.

h_{tx}	Altura de la antena transmisora en metros, válido para $30m < h_{tx} < 200m$.
h_{rx}	Altura antena receptora en metros, válido para $1m < h_{rx} < 10m$.
$a(h_{rx})$	Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, depende del tipo de ciudad.
d	Distancia entre transmisor y receptor en km.

El factor de corrección de altura puede tomar distintos valores dependiendo del ambiente en el cual se desarrolle el estudio de propagación, entonces $a(h_{rx})$ se define según la ciudad.

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{rx})[dB] = [1.1 \log(f_c) - 0.7] h_{rx} - (1.56 \log_{10}(f_c) - 0.8) \quad (8)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{rx})[dB] = 3.2 [\log_{10}((11.75) h_{rx})]^2 - 4.79 \quad (9)$$

Aunque el modelo está definido para ambientes urbanos, también existen correcciones para el cálculo de las pérdidas en ambientes suburbanos y rurales, se muestran en las siguientes ecuaciones.

Para áreas suburbanas:

$$L[urb] = L(urb) - 2(\log_{10}(f_c/28))^2 - 5.4 \quad (10)$$

Para áreas rurales:

$$L[urb] = L(urb) - 4.78 \log_{10}(f_c)^2 + 18.33 \log_{10}(f_c) - 40.94 \quad (11)$$

Debido al creciente uso de frecuencias mayores para las comunicaciones móviles, el modelo Okumura-Hata se amplió para estas frecuencias, de donde nació el modelo COST 231.

2.5 Modelo de Propagación COST 231

Modelo desarrollado por la Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica. Este modelo es una extensión en frecuencia del modelo de Okumura-Hata. Modelo generalmente utilizado para frecuencias menores a 2000 MHz, también es usado en predicciones para 2.5GHz. De igual manera el modelo puede ser extrapolable a 3.5 GHz asumiendo una menor precisión de los resultados, de acuerdo a lo mencionado por (COST-231, 1999).

El modelo indica las pérdidas con la siguiente ecuación:

$$L(urb)[dB] = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{tx}) \dots \quad (12)$$

$$- a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{tx})) \log(d) + C_M$$

Donde C_M es un factor de corrección para adecuar el modelo, extendiendo el rango de la

frecuencia. El factor de corrección se basa en pruebas semi empíricas, demostrando que para grandes ciudades es mayor que para áreas suburbanas. C_M Puede tomar los siguientes valores:

$C_M = 0$ dB para ciudades medianas y áreas suburbanas.

$C_M = 3$ dB para centros metropolitanos

EL valor de la ganancia a (h_{rx}) corresponde al resultado de las mismas ecuaciones descritas para el modelo Okumura-Hata

1.5 Modelo de propagación Young

Considera una metrópolis con edificios altos. En este caso, las pérdidas de propagación vienen dadas por:

$$L[dB] = -G_{eb} - G_m - 20 \log_{10} h_{eb} \dots - 20 \log_{10} h_m + 40 \log_{10} d + \beta \quad (13)$$

Dónde:

G_{eb}	Ganancia de la antena de la estación radio base (dBi)
G_m	Ganancia de la antena del móvil (dBi)
h_{eb}	Altura de la antena de la estación radio base (m)
h_m	Altura de la antena del móvil (m)
β	Factor de densidad de edificios (25dB para grandes ciudades)

2.5 Diseño del modelo experimental

El componente básico de estudio se soporta en la publicación "*estudio de la predicción de cobertura en ambientes semiurbanos mediante método experimental para sistemas inalámbricos en la banda de 2.4 Ghz*", el método se basa en las mediciones de niveles de potencia de señal en ambientes semi-urbanos, para la ubicación de una estación móvil con respecto a una estación base transmisora. (Herrera, 2013).

Para cuantificar los posibles errores de predicción de la potencia recibida, se comprueba con cálculos matemáticos a través de técnicas de regresión no lineal de modelos de estimación y análisis estadísticos; realizando la variación de la altura y la potencia de la estación transmisora principal, con el fin de determinar la máxima cobertura de acuerdo al nivel de potencia recibido y la ubicación de los equipos receptores. (Herrera, 2013).

Las mediciones se realizan en presencia de condiciones que tienden a disminuir la precisión alcanzable, puede mejorarse la situación realizando mediciones agrupadas cuando las

observaciones sean con aparatos portátiles y tomando el promedio de los resultados o efectuando registros continuos de la intensidad de campo, como es el caso de la toma de 60 muestras por minuto, considerando el error en las mediciones y el ruido del sistema de medición. (Manual de comprobación técnica espectro, Tomo 1, UIT, 2011.)

De acuerdo a lo citado en la norma, para "La posible precisión en condiciones normales con instalaciones portátiles o móviles hace que la precisión lograda no se satisfice en todos los casos por lo dispuesto en la recomendación UIT-R 378, pero aún así, la capacidad de recepción omnidireccional" hace de la antena de $\lambda/4$ un instrumento útil para realizar mediciones de campo, útil en el caso de estudio. (Recomendación UIT-R P.1406).

3. FORMULACIÓN DEL MODELO

Con la utilización del Software SSPS Versión 15, se analizan y aplican las técnicas de regresión no lineal utilizadas en el desarrollo de modelos experimentales, obtenidos a partir de mediciones para la estimación de la cobertura en redes WLAN operando en 2,4 GHz, en ambientes sub urbanos o semi urbanos para exteriores. (Oliveras *et al.*, 2006).

En el procedimiento analítico se agruparon las mediciones de cada uno de los ambientes sub urbanos categorizados en grupos de medidas de acuerdo al área geográfica de influencias y se obtuvieron datos promedios de los niveles de recepción de potencia cada 5 metros, después se procede a seleccionar el método de regresión no lineal para estimar una función de la forma:

$$L_{sub} = a + b \cdot \log(D) \quad (14)$$

Por correspondencia tenemos que: $a=A$ y $b=\gamma$

También de la forma:

$$L_{sub}[dB] = A + 10 \gamma \log D \quad (15)$$

Donde "A" es un factor que incluye las pérdidas de potencia con la altura del transmisor, múltiples reflexión, obstáculos, entre otros.; y " γ " es el ya mencionado, exponente de pérdidas de la potencia con la distancia. (Reid *et al.*, 2006)

Ahora bien, dado que las mediciones realizadas se refieren al nivel de potencia recibida y no a las pérdidas de la señal, la expresión (15) es equivalente a la de potencia, cambiando los signos de los dos términos (los términos que

aparecen sumando en una ecuación de pérdidas de potencia, deben aparecer substrayendo en la correspondiente ecuación de potencia recibida). Por tanto, se tiene:

$$P_R(dBm) = -A - 10 \gamma \log d \quad (16)$$

Donde P_R representa el nivel de señal recibida, "d" es dada en metros y los parámetros de "A" y "γ" son las variables obtenidas del modelo de regresión no lineal producto del análisis estadístico.

Se analizan las mediciones obtenidas para los dos tipos de ambientes y como resultado de la regresión no lineal estadística se obtiene la expresión general, con los parámetros γ y $kp1 + kp2 + kA1 + km$, que permita realizar el cálculo de las potencias medidas con respecto a las teóricas de acuerdo al factor de pérdida según el ambiente sub urbano en donde se desee aplicar, así:

$$P_{Sub}(dBm) = -28,9042 - 21,3890 \log d + kp1 + kp2 + kA1 + km \quad (17)$$

4. PROCESO DE AJUSTE Y COMPROBACIÓN

Con el fin de realizar un ajuste a la ecuación (17) obtenida en el proceso de un "Modelo experimental de radio propagación en ambientes exteriores para sistemas inalámbricos en la banda de frecuencia de 2.4 Ghz" (Herrera, 2013), en donde se determinaron factores de corrección de forma empírica, se puede realizar una comparación con el modelo de pendiente única de acuerdo al trabajo realizado por (Pedraza *et al.*, 2009) sobre el análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la Universidad Militar donde se cita textualmente "*Dentro de los modelos que se usan en el estudio de entornos móviles, en general predominan los de No Línea de Vista, aunque no se deben descartar los de Línea de Vista. En general, todos ellos se basan en medidas experimentales. Dentro del método COST 231 (método usado para entornos exteriores), se han propuesto modelos de análisis simplificados como los descritos a continuación*" y de dicho desarrollo parte de una expresión general a considerar (expresión del modelo de pendiente única):

$$L_p[dB] = 10 \log(kd)^n \quad (18)$$

Donde:

- d Distancia entre transmisor y receptor.
- n Pérdida por trayectoria.
- k Factor dependiente de la propagación en el espacio libre.

Realizado el análisis matemático obtiene el valor de n y k , mediante las ecuaciones:

$$n = \frac{C2 \cdot \ln(10)}{10} \quad (19)$$

$$k = 10^{k1/10n} \quad (20)$$

Ahora bien, de la ecuación 17, obtenida como resultado de una línea de tendencia logarítmica por métodos de regresión no lineal, se obtiene $C2$ y $k1$, para aplicarlos en 18, reemplazarlos los $C2=21,3890$ y $k1=28,9042$ y se obtiene la expresión general de forma:

$$Lp[dB] = 10 \log_{10} (4.9249d)^{3.9627} \quad (21)$$

$$L[dB] = L_0 + 10n \log_{10} d(m) \quad (22)$$

Con el fin de inferir sobre las posibles variaciones que en muchos casos son inevitables y son producidos por factores que distorsionan el nivel de señal de la medida, se puede tipificar el error típico como otro factor adicional al sistema de ecuaciones, propuesto en forma general para ambiente semi urbano por tratarse de una desviación típica de una distribución muestral de los niveles de potencia medida, debido a este tipo de error se debe abarcar y tener en cuenta los siguientes errores: errores de muestreo, error producción por el ruido electrónico de los equipos transmisores como receptores y error de tratamiento de los datos; como el sistema también se delimito como un modelo de gran escala es posible comparar y ajustar los datos obtenidos al modelo de pérdida de trayectoria de la señal, debido a que, se tiene una aproximación de tipo log-normal por los ensombrecimiento que disminuye la intensidad de la señal por efecto de los fenómenos físicos, siendo el caso de: la reflexión y el efecto de desvanecimiento por multi trayectoria; teniendo en cuenta lo anterior se puede incluir el término E_c (expresado en dBm o de acuerdo a las unidades establecidas y con valor negativo por tratarse de una disminución del nivel de potencia recibido) y considerarlo como el error típico producto de la cuantía del error en el pronóstico de la potencia esperada, como resultado del análisis estadístico según los datos tomados (Villamizar *et al.*, 2013), en general la expresión 17 se puede expresar como:

$$P_{Sub}(dBm) = -28.9042 - 21.3890 \log_{10} d + kp1 + kp2 + kA1 + km - E_c \quad (23)$$

Una forma de comprobar el modelo empírico obtenido, es ajustar los datos de la expresión matemática al modelo logarítmico de pérdidas de trayectoria con respecto a la (log-distance path loss model) y expresar las distancias en kilómetros, de las medidas entre el transmisor y el receptor se deduce que:

$$PL(D) = PL(d0) + 10n \log(d/d0) \quad (24)$$

$$PL(D) = PL(d0) + 10 \cdot 2.1389 \cdot \log(d/d0) \quad (25)$$

Donde $PL(d0)$ es la potencia medida en la última distancia y $d0$ es el valor de la distancia en ese punto.

Teniendo como base dicha expresión analítica, de acuerdo al estudio realizado por (Fernández et. al, 2012) “Donde $PL(d0)$ es un valor de pérdida de trayectoria de referencia sobre la base de mediciones obtenidas a una distancia $d0$ siendo esta la última distancia tomada. El parámetro n representa el exponente de propagación que indica la velocidad en donde la pérdida de trayectoria incrementa con la distancia”, es posible demostrar que las variaciones entre los dos modelos son pequeñas.

Es importante destacar que el modelo de pérdidas por trayectoria es utilizado para ambientes en interiores y áreas densamente pobladas, pero en este trabajo se realiza el ajuste para ambientes exteriores, teniendo en cuenta las investigaciones de (Fernández et. al, 2012) .

Para comprobar las ecuaciones, se realiza el análisis en dos ambientes semi urbanos, tomando como referencia los datos obtenidos en la tabla 1 a la 4, se resalta el valor de precisión de las ecuación de regresión no lineal del ambiente semi urbano dos con coeficiente de correlación $R^2 = 0,8287$ (porcentaje de precisión del 82,87%) como un indicador admisible que da el ajuste más próximo a 1 (100%) y determina la proporción de variabilidad del nivel de potencia entre la variable dependiente (potencia) con respecto a la variable independiente (distancia), lo cual indica un valor de ajuste aceptable para predecir el nivel de potencia recibido, caso contrario sucede con el ambiente semi urbano 1 en donde $R^2 = 0,2631$ (porcentaje de precisión del 26,31%) indicando un posible error en la toma de las muestras o el efecto de factores en el momento de las mediciones.

Por otra parte, el modelo de pendiente no tiene en cuenta otros factores de atenuación, parámetros de corrección y posibles errores, por tanto no es tan exacto al momento de comparar los resultados con los valores medidos en el ambiente semi urbano 1, no obstante en el caso del ambiente semi urbano dos, si lo es, debido a la precisión de modelo experimental cuenta con un 82,87 % de efectividad, también se puede inferir que a partir de la ecuación de regresión se obtiene los factores n y k necesarios para construir el modelo de pendiente única.

Se observa que las desviaciones estándar de aproximadamente todos los modelos oscila

entre ± 7 dBm a ± 9 dBm, valores que pueden ser tanto positivos como negativos variando significativamente el valor de la muestra medida y la calculada.

En las figuras 2 y 3 se aprecia que al extrapolar el modelo de Young para un ambiente sub urbano se debe considerar el factor de pérdidas para edificios, debido a su diseño para ambientes urbanos, por tanto el error típico es alto y afecta la precisión de los cálculos, para este caso se deben realizar mediciones y determinar el factor de perdida sujeto al ambiente deseado. El modelo Okumura está muy alejado de los datos reales sin embargo, el modelo de Okumura Hata y Cost-231 son los más indicados para este tipo de ambientes comparando los resultados medidos experimentalmente, no obstante con un alto sesgo estadístico debido a la desviación típica encontrada en el orden de los 14dBm.

Tabla 1. Datos obtenidos Ambiente semi urbano campus universitario Villa del Rosario (ambiente semiurbano 1) parte A.

Distancia de medidas en metros	Pérdidas espacio libre (2457 Mhz)	Medidas de niveles potencia en dBm	Ecuación de regresión no lineal	Ecuación modelo de pendiente
Distancia (d)	PEL (dBm)	P Media Villa 2014 (dBm)	$y = -2,07 \ln(d) - 56,7$; $R^2 = 0,2631$	$y = 10 \log(k \cdot d)^n$
5	-54,24	-57,77	-60,03	-50,30
10	-60,26	-62,74	-61,47	-51,74
15	-63,78	-59,46	-62,31	-52,58
20	-66,28	-66,70	-62,90	-53,17
25	-68,22	-64,73	-63,36	-53,64
30	-69,80	-63,33	-63,74	-54,01
35	-71,14	-69,05	-64,06	-54,33
40	-72,30	-66,11	-64,34	-54,61
45	-73,32	-65,00	-64,58	-54,85
50	-74,24	-63,04	-64,80	-55,07
55	-75,07	-65,31	-65,00	-55,27
60	-75,82	-62,23	-65,18	-55,45
65	-76,52	-64,66	-65,34	-55,61
70	-77,16	-63,77	-65,49	-55,77
75	-77,76	-61,27	-65,64	-55,91
80	-78,32	-63,15	-65,77	-56,04
85	-78,85	-65,23	-65,90	-56,17
90	-79,34	-63,26	-66,01	-56,29
95	-79,81	-70,17	-66,13	-56,40
100	-80,26	-71,27	-66,23	-56,51



Fig. 2: Comparación de modelos en un ambiente semiurbano 1

Tabla 2. Datos obtenidos Ambiente semi urbano campus universitario Villa del Rosario (ambiente semiurbano 1) parte B.

Distancia de medidas en metros	Ecuación general para semi urbano. Método semiempírico	Ecuación general para semi urbano con factor de corrección. Método semiempírico	Modelo log-distance (km)
Distancia (d)	$y = -28,9042 - 21,389 \cdot \text{LOG}_{10}(d)$	$y = -28,9042 - 21,389 \cdot \text{LOG}_{10}(d)$	$Y = -71,27 - (20,7 \cdot \text{LOG}_{10}((d/1000)/0,1))$
5	-43,85	-46,78	-43,44
10	-50,29	-53,22	-49,88
15	-54,06	-56,99	-53,65
20	-56,73	-59,66	-56,32
25	-58,80	-61,73	-58,39
30	-60,50	-63,43	-60,09
35	-61,93	-64,86	-61,52
40	-63,17	-66,10	-62,76
45	-64,26	-67,19	-63,85
50	-65,24	-68,17	-64,83
55	-66,13	-69,06	-65,72
60	-66,94	-69,86	-66,52
65	-67,68	-70,61	-67,27
70	-68,37	-71,30	-67,96
75	-69,01	-71,94	-68,60
80	-69,61	-72,54	-69,20
85	-70,17	-73,10	-69,76
90	-70,70	-73,63	-70,29
95	-71,21	-74,13	-70,79
100	-71,68	-74,61	-71,27

Tabla 3. Datos obtenidos ambiente semi urbano Barrio Parques Residenciales(ambiente semi urbano2) parte A.

Distancia de medidas en metros	Pérdidas en espacio libre(2375Mhz)	Medida de niveles potencia en dBm	Ecuación de regresión no lineal	Ecuación modelo de pendiente
Distancia (d)	PEL (dBm)	datos medidos	$y = -9,778 \ln(d) - 23,461$; $R^2 = 0,8287$	$y = 10 \log(k \cdot d)^n$
5,00	-54,24	-46,56	-39,20	-39,20
10,00	-60,26	-47,17	-45,98	-45,98
15,00	-63,78	-49,96	-49,94	-49,94
20,00	-66,28	-51,08	-52,75	-52,75
25,00	-68,22	-51,63	-54,94	-54,93
30,00	-69,80	-52,49	-56,72	-56,72
35,00	-71,14	-55,37	-58,23	-58,22
40,00	-72,30	-52,42	-59,53	-59,53
45,00	-73,32	-55,67	-60,68	-60,68
50,00	-74,24	-62,61	-61,71	-61,71
55,00	-75,07	-61,84	-62,64	-62,64
60,00	-75,82	-62,62	-63,50	-63,50
65,00	-76,52	-64,60	-64,28	-64,28
70,00	-77,16	-66,68	-65,00	-65,00
75,00	-77,76	-65,49	-65,68	-65,68
80,00	-78,32	-65,11	-66,31	-66,31
85,00	-78,85	-69,39	-66,90	-66,90
90,00	-79,34	-70,09	-67,46	-67,46
95,00	-79,81	-72,99	-67,99	-67,99
100,00	-80,26	-74,16	-68,49	-68,49

Al aplicar el factor de corrección a la ecuación 17 obtenida anteriormente para el ambiente sub urbano en particular, se aprecia que la ecuación permite un ajuste mas real si se compara con los datos medidos en campo, pero, es necesario agregar el término E_c para compensar las pérdidas y errores en la mediciones, este valor debe oscilar entre 1,5dBm a 3,6 dBm, representando un 2,3% al 5,5% de valor de la media obtenida de las mediciones, además se observa una tendencia similar de los valores de potencia entre el modelo long-distance y modelo de ajuste experimental.

Tabla 4. Datos obtenidos ambiente semi urbano Barrio Parques Residenciales(ambiente semi urbano2) parte B.

Distancia de medidas en metros	Ecuación general para semi urbano. Método semiempírico	Ecuación general para semi urbano con factor de corrección. Método semiempírico	Modelo log-distance (km)
Distancia (d)	$y = -28,9042 - 21,389 \cdot \text{LOG}_{10}(d)$	Con factor corrección $y = -28,9042 - 21,389 \cdot \text{LOG}_{10}(d) - 2,9274$	$Y = -74,16 - (21,389 \cdot \text{LOG}_{10}((d/1000)/0,1))$
5,00	-43,85	-46,78	-46,33
10,00	-50,29	-53,22	-52,77
15,00	-54,06	-56,99	-56,54
20,00	-56,73	-59,66	-59,21
25,00	-58,80	-61,73	-61,28
30,00	-60,50	-63,43	-62,98
35,00	-61,93	-64,86	-64,41
40,00	-63,17	-66,10	-65,65
45,00	-64,26	-67,19	-66,74
50,00	-65,24	-68,17	-67,72
55,00	-66,13	-69,06	-68,61
60,00	-66,94	-69,86	-69,41
65,00	-67,68	-70,61	-70,16
70,00	-68,37	-71,30	-70,85
75,00	-69,01	-71,94	-71,49
80,00	-69,61	-72,54	-72,09
85,00	-70,17	-73,10	-72,65
90,00	-70,70	-73,63	-73,18
95,00	-71,21	-74,13	-73,68
100,0	-71,68	-74,61	-74,16

5. CONCLUSIONES

En esta clase de análisis estadístico, basado en mediciones de campo se debe resaltar los tipos de desvanecimiento a gran escala, porque se predice el comportamiento de los niveles de potencia que se recibe de acuerdo a la distancia y el desvanecimiento de pequeña escala, por la fluctuación rápida de la fase y la amplitud de la señal en periodos cortos por donde viaja la onda.

Los modelos de regresión no lineal son una herramienta que permite estimar modelos con relaciones arbitrarias entre las variable dependiente e independiente, pero es conveniente determinar las restricciones para hallar los parámetros durante los cálculos en la búsqueda de una solución analítica aproximada.

Si se compara el valor de la media obtenida en los datos tabulados y las expresiones analíticas estudiadas con la desviación típica, es concurrente afirmar que existe una variación del nivel de potencia entre el 11% y el 14%, representada por la varianza de la señal, además cuando se extrapolan e interpolan los datos con los modelos establecidos para sistemas de radio propagación, el valor aumenta considerablemente, por tanto es necesario hacer los ajustes necesarios y la corrección con los modelos, siempre y cuando se realice la confinación de los ambientes y se pueda enriquecer la información con la toma de más

muestras para corroborar la efectividad del modelo estudiado, además la desviación estándar esta en el rango de 7 a 9dBm y los errores cercanos a 3 o 4dBm.

Los resultados de las mediciones se realizaron con equipos comerciales ajustando parámetros al ambiente y se consideraron las limitaciones técnicas de los equipos, es necesario emplear equipos de medición de alta precisión y exactitud como: el analizador de espectros, medidor de campo para la frecuencia de 2.4 Ghz y el analizador de redes vectoriales, sin embargo, el uso de las herramientas y programas computacionales permite hacer aproximaciones y ajustes matemáticos para obtener suficientes curvas y lograr un método más ajustado.

En un estudio de radio propagación es importante analizar la calidad y la potencia de la señal con el fin de mejorar la cobertura y garantizar niveles de potencia dentro de un margen de aceptación para cuantificar el nivel de sensibilidad en los equipos recepción.

Se recomienda continuar realizando mediciones, para obtener un modelo experimental más compacto y aceptable en este tipo de ambientes y a la frecuencia de trabajo propuesta.

REFERENCIAS

- COST Telecommunications. (1999). "Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems - COST 231 Final Report", Bélgica.
- Hata M. (1980). "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services". IEEE Transactions on Vehicular Technolgy, Vol. VT-29, No. 3, pp. 317-325.
- Herrera R., J. E. (2013). Predicción de cobertura en ambientes semiurbanos mediante método experimental para sistemas inalámbricos en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 2, No. 22, pp. 68-77.
- Fernández, M., *et. al* (2012). XXX simpósio brasileiro de telecomunicações – sbtr'12, Brasília, df Adjustments of Log-Distance Path Loss Model for Digital Televisión in Lima. journal, 13-16.
- Manual de comprobación técnica espectro, Tomo 1, UIT, 2011.
- Oliveras Pla, Marc y Ruiz López, Daniel. (2006). Proyecto final de carrera de la Universidad Politécnica de Cataluña. [tesis en línea]. Universidad de Cataluña, España. http://biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_datos_PFC.asp?id=53876. (Consultado: el 8 de febrero de 2007).
- Patiño N. *et al.* (2013). Modelamiento matemático del problema de ocupación de quirófanos, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 2, No. 20, pp. 43-49.
- Pedraza, M. L. F, Hernández, S. C. A, Ballesteros L. D. (2009). Análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la universidad militar. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada, Vol. 19, No. 2, pp. 45-58.
- Rappaport Theodore S. (2002). Wireless Communications Principles and practice, Segunda Edición, Prentice Hall, United State of America, pp.139-196.
- Recomendación UIT-R P.1406. (2011). Aspectos de la propagación relativos al servicio móvil terrestre terrenal en las bandas de ondas métricas y decimétricas.
- Reid N. y Seide R. (2006). 802.11 (Wi-Fi), McGraw Hill.
- Villamizar W., Mendoza, L. y Santafe, P. (2013) Implementation of pattern recognition techniques (support vector machines - least square) in selection of parameters used in metabolomic systems, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 21, pp. 104-112.